

Графовые алгоритмы для расчёта распределения следов амурского тигра на территории Приморского края

© 2024. Г. Ш. Цициашвили¹, д. ф.-м. н., г. н. с.,
В. Н. Бочарников², д. б. н., в. н. с.,
С. М. Краснопеев², к. ф.-м. н., в. н. с.,
М. А. Осипова¹, к. ф.-м. н., н. с.,

¹Институт прикладной математики
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7,
²Тихоокеанский институт географии
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7,
e-mail: guram@iam.dvo.ru

В работе анализируется распределение числа следов амурского тигра в муниципальных образованиях Приморского края по наблюдениям, полученным в период единовременного зимнего учёта, организованного Тихоокеанским институтом географии Дальневосточного отделения РАН в 2005 г. Эта задача связана с необходимостью подсчёта численности зверей по следам его жизнедеятельности. По исходным данным была сформирована выборка для анализа множества следов с целью выделить области пересечения различных районов обитания тигра в Приморском крае. Для выявления их пересечений карта муниципальных образований Приморского края была представлена в виде плоского графа, и методами теории графов был разработан рекуррентный алгоритм выделения тигриных кластеров. По ним территория Приморского края разбита на северную, центральную, южную и юго-западную зоны, имеющие пересечения. Подсчитано общее число следов в пересекающихся соседних зонах с целью выявления возможных миграций тигров между ними.

Ключевые слова: тигриные кластеры, планарные графы, число следов, зоны влияния.

Graph algorithms for calculating the distribution of the Amur tiger tracks in Primorsky Krai

© 2024. G. Sh. Tsitsiashvili¹ ORCID: 0000-0003-2600-0474¹
V. N. Bocharnikov² ORCID: 0000-0002-6574-7864²
S.M. Krasnopeev² ORCID: 0000-0001-8409-7062²
M.A. Osipova¹ ORCID: 0000-0001-5615-9449¹

¹Institute of Applied Mathematics FEB RAS,
7, Radio St., Vladivostok, Russia, 690041,
²Pacific Institute of Geography FEB RAS,
7, Radio St., Vladivostok, Russia, 690041,
e-mail: guram@iam.dvo.ru

The paper analyzes the distribution of the Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) tracks in the Primorsky Krai municipalities according to observations obtained during the one-time winter count organized by the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences in 2005. This task is related to the need to calculate the number of animals based on the tracks of their vital activity. Based on the initial data we form a sample to analyze a set of tracks to identify intersection areas of various tiger habitats in Primorsky Krai. The map of Primorsky Krai municipalities was presented in the form of a planar graph to identify their intersections. A recurrent algorithm for identifying tiger clusters was developed using graph theory methods. According to them, the territory of Primorsky Krai is divided into northern, central, southern and southwestern zones with intersections. The districts of Primorsky Krai included in the designated zones are listed. The total number of tracks in intersecting adjacent zones was counted to identify possible tiger migrations in Primorsky Krai. A quantitative assessment of the degree of intersection of the selected zones by the number of tiger tracks is given. The proposed calculation scheme can be used to clarify and verify the results of modeling the spatial distribution and total population size of the Amur tiger.

Keywords: tiger clusters, planar graphs, number of tracks, zones of influence.

Тигр – уникальный объект мировой фауны, самый крупный хищник Евразии, верхнее звено трофической цепи лесных экосистем Южной и Восточной Азии [1–3]. Амурский тигр *Panthera tigris altaica* – наиболее северный подвид, популяция которого полностью находится под охраной Российской Федерации (РФ) [4, 5].

Особое значение в сохранении этого вида играет знание о состоянии популяции данного хищника. В этой связи широкое распространение получили методы подсчёта численности зверей по следам его жизнедеятельности [6, 7]. К сожалению, до настоящего времени применяемые зоологами способы обработки разнообразных сведений, полученных таким путём, практически лишены специальной математической обработки. Это приводит к трудностям получения, объяснения и обсуждения территориальных закономерностей распределения амурского тигра по массовым материалам зимних маршрутных учётов [8, 9]. Местообитания амурского тигра разнообразны по характеру рельефа, растительности и экологическим условиям, но на всей территории его обитания в зимний период лежит постоянный снеговой покров, что позволяет применять методы визуальной фиксации тигриных маршрутов. Сочетание в экосистеме взаимосвязей в иерархии многих природных, природно-антропогенных и антропогенных объектов в задачах экологического мониторинга требует применения сложных информационно-технологических решений, использующих серьёзную математическую базу [10, 11].

Цель исследования – разработка и апробация нового метода математической обработки данных по выделению на территории Приморского края РФ различных зон обитания тигра и их пересечений для выявления возможных миграций тигров между ними.

Объекты и методы исследования

В современных условиях для зоологов основным методом расчёта численности следов амурского тигра является фиксирование их следов при проведении специальных учётных маршрутов в зимний период. Для расчёта числа следов выполнена индивидуальная локализация и визуализация на карте каждого следа амурского тигра. Средствами геоинформационной системы (ГИС) обрабатывали фиксированные точки регистрации следов амурского тигра.

На первом этапе выполнено геоинформационное картографирование (рис. 1) и осу-

ществлено суммирование по зарегистрированным в поле учёточками следов тигров в пределах конкретных муниципальных образований (МО) Приморского края. Эти расчёты были сделаны на основе выборки из географической базы данных Тихоокеанского института географии ДВО РАН за 2005 год с частичным дополнением сведений из географической базы данных Амурского филиала Фонда дикой природы.

Методической сложностью для корректного восприятия материалов геоинформационного картографирования является тот факт, что некоторые тигры могут территориально находиться не в пределах одного административного района, а совершать регулярные перемещения за его пределы. Такие локализации «кочующих» тигров нельзя чётко определить, так как они могут меняться, образуя административно пересекающиеся «зоны влияния». Отчасти такие особи могут обозначаться исследователями и охотниками, хорошо знающими обследуемый участок.

Характер территориального распределения популяционных группировок амурского тигра на территории Приморского края различен. Причин возникновения такой ситуации может быть несколько. Во-первых, Приморский край обладает высоким уровнем ландшафтного разнообразия, в этой связи объективными являются существенные различия в биологической продуктивности охотничьих угодий тигра. Во-вторых, распределение тигра очень зависит от глубины снежного покрова, что по климатическим условиям не является одинаковым даже в пределах одного административного района. Нельзя также исключить индивидуальные предпочтения тигров, которые формируются в зависимости от их социального статуса, пола, возраста. Кроме того, распространение хищника корректируется фактическим антропогенным воздействием.

На втором этапе была составлена таблица 1, в которой перечислены названия МО в соответствии с номерами на карте и зарегистрированным общим числом следов тигра по данным единовременного зимнего учёта 2005 г. [12]. Из последующего рассмотрения были исключены районы, по которым нет данных о численности следов тигра, например, Артем (на рисунке 1 обозначение II), Владивосток (на рисунке 1 обозначение III).

Следует отметить, что нами для общих расчётов по кластеризации следов тигра, в отличие от обычных ориентиров на свойственные местообитания в зоологических работах,

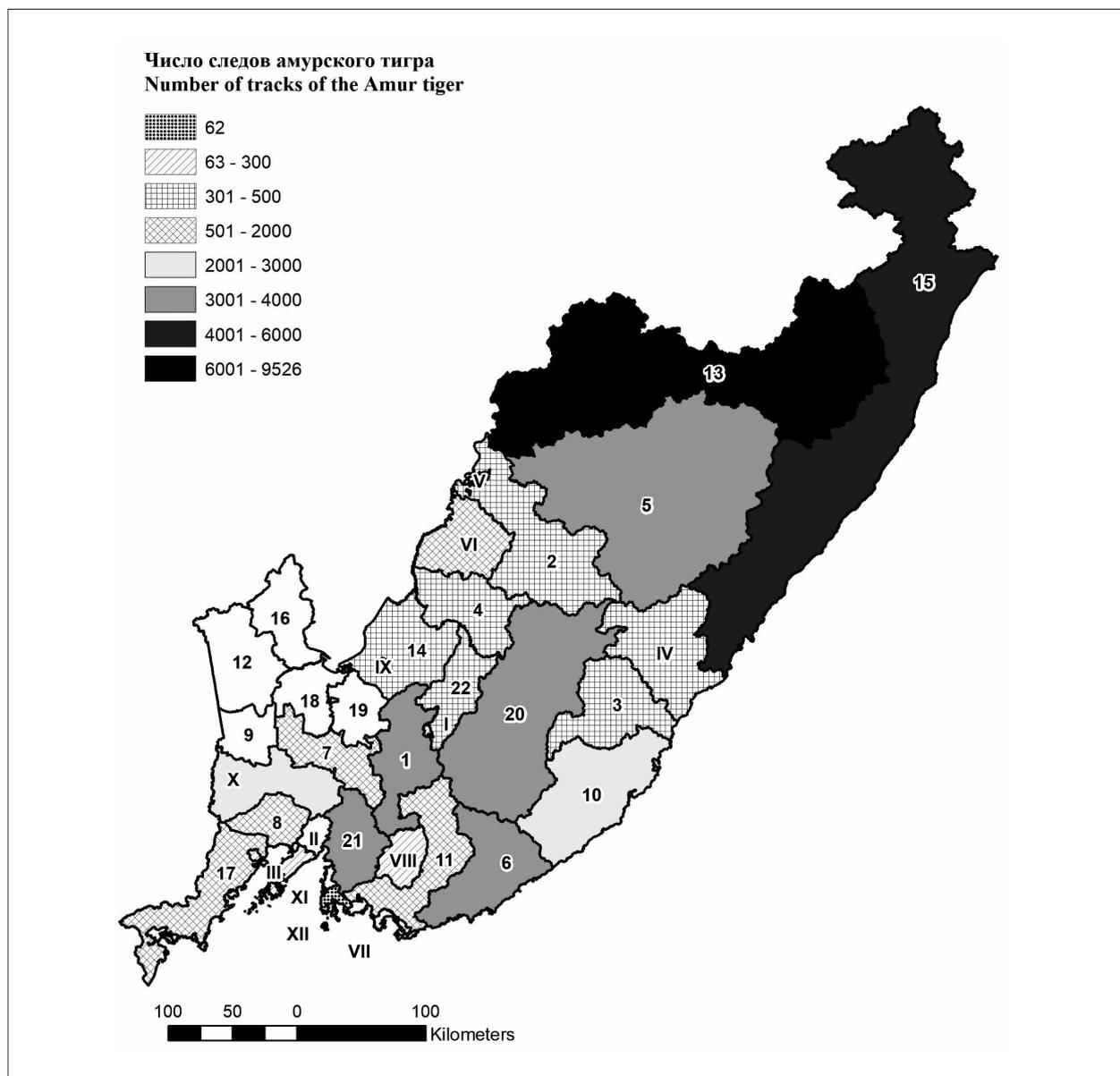


Рис. 1. Распределение числа следов амурского тигра по территории Приморского края
Fig. 1. Distribution of the *Panthera tigris altaica* tracks in Primorsky Krai

не исключались пригородные территории и категории земель, не отнесённые к государственному лесному фонду, что позволило более точно показывать пространственные закономерности распределения амурского тигра.

На третьем этапе работы предполагалось вначале построить нечёткую классификацию административных районов по наличию или отсутствию у них общих границ, а затем посмотреть, насколько следы тигров соответствуют этой классификации. В результате должны быть построены тигриные кластеры и выявлены области их пересечения. Для более корректного анализа и показа графических и картографических материалов в работе предложено использовать элементы теории графов

в контексте дополнения и усовершенствования расчётных основ определения численности амурского тигра на территории РФ.

Результаты и обсуждение

Для математической обработки полученных данных каждое МО, указанное в таблице 1, представляется как грань планарного графа (часть плоскости, ограниченная рёбрами этого графа). Далее исходному планарному графу (плоский граф, у которого рёбра не пересекаются) был сопоставлен планарный граф G_1 : вершинами графа являются грани, а рёбра соединяют две вершины, если между соответствующими гранями есть граница (рис. 2).

На втором шаге планарному графу G_1 сопоставили планарный граф G_2 . Вершинами графа G_2 являются грани, а рёбра соединяют две вершины, если между соответствующими гранями есть граница (которая может состоять не из одного ребра). Вершинами графа G_2 обозначим множества номеров вершин соответствующей грани. В нашем случае, например, вершина {10, 18, 20} графа G_2 (см. рис. 3) соответствует грани графа G_1 , являющейся треугольником с вершинами 5, 13, 15. Если в графе G_1 есть вершины, не входящие ни в какую грань, и рёбра их соединяющие, то эти вершины и рёбра без изменений входят в граф G_2 .

Аналогичным образом преобразуем планарный граф G_2 в планарный граф G_3 и т. д.

до тех пор, пока не получим граф без граней. В нашем случае эта процедура заканчивается на третьем шаге (рис. 4). Описанная выше рекуррентная процедура преобразования планарных графов похожа на процедуру построения двойственного графа (см., например, [13–15]) и связанную с ней процедуру кластеризации (см., например, [16]).

Перейдём теперь к анализу числа следов амурского тигра в построенной иерархической нечёткой классификации МО Приморского края. Для этого воспользуемся информацией о числе зимних следов тигра в этих районах (табл. 1). Подсчитаем суммарное число следов (табл. 2) в районах, соответствующих каждой вершине графа G_3 и суммарное число следов в районах, входящих в две соседние вершины,

Таблица 1 / Table 1

Число следов амурского тигра в районах Приморского края
The number of the *Panthera tigris altaica* tracks in the regions of Primorsky Krai

№ округа No. of district	Муниципальные образования Приморского края Municipalities of Primorsky Krai	Общее число тигриных следов, зафиксированное учётчиками Total number of tiger tracks recorded by census takers
1	Анучинский / Anuchinsky	3815
I	Арсеньев, окр. / Arseniev, district	64
IV	Дальнегорск, окр. Dalnegorsk, district	477
2	Дальнереченский Dalnerechensky	402
XII	ЗАТО Фокино / ZATO Fokino	62
3	Кавалеровский Kavalerovsky	422
4	Кировский / Kirovsky	455
5	Красноармейский Krasnoarmeisky	3155
6	Лазовский / Lazovsky	3196
VI	Лесозаводск, окр. Lesozavodsk, district	544
7	Михайловский / Mikhailovsky	710
8	Надеждинский / Nadezhdinsky	716
10	Ольгинский / Olginsky	2574
VIII	Партизанск, окр. Partizansk, district	245
11	Партизанский / Partizanskiy	1677
13	Пожарский / Pozharsky	9526
14	Спаский / Spassky	321
15	Тернейский / Terney	5874
X	Уссурийск, окр. Ussuriysk, district	2374
17	Хасанский / Khasansky	1404
20	Чугуевский / Chuguevsky	3699
21	Шкотовский / Shkotovsky	3206
22	Яковлевский / Yakovlevsky	448

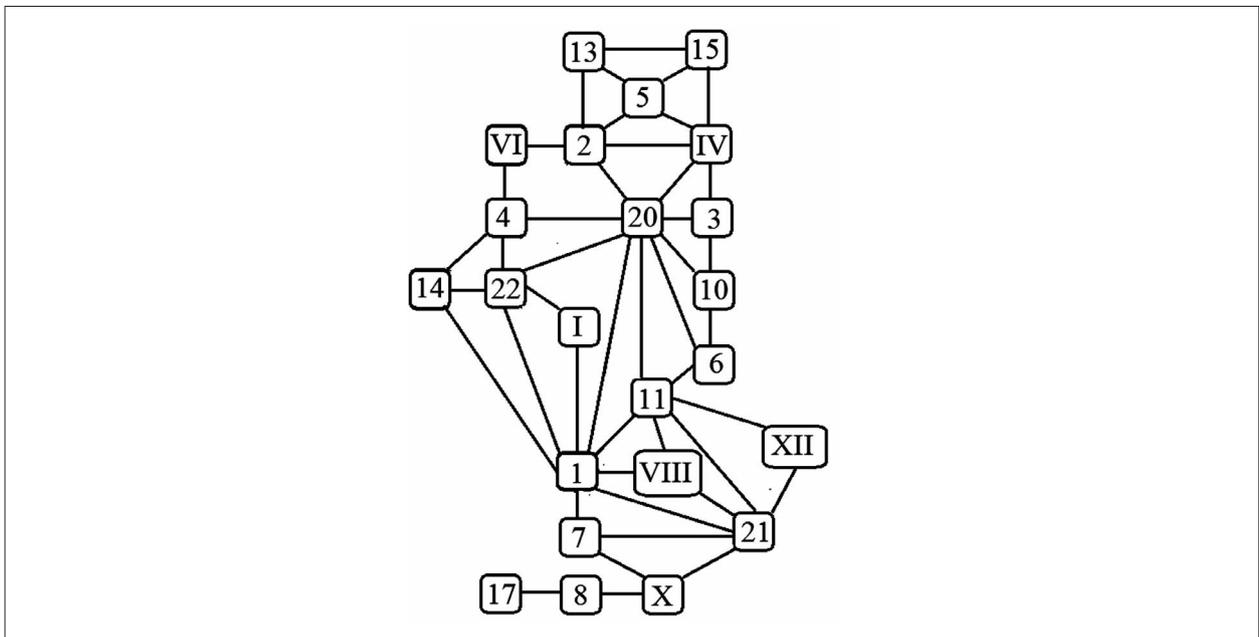


Рис. 2. Планарный граф G_1 / Fig. 2. Planar graph G_1

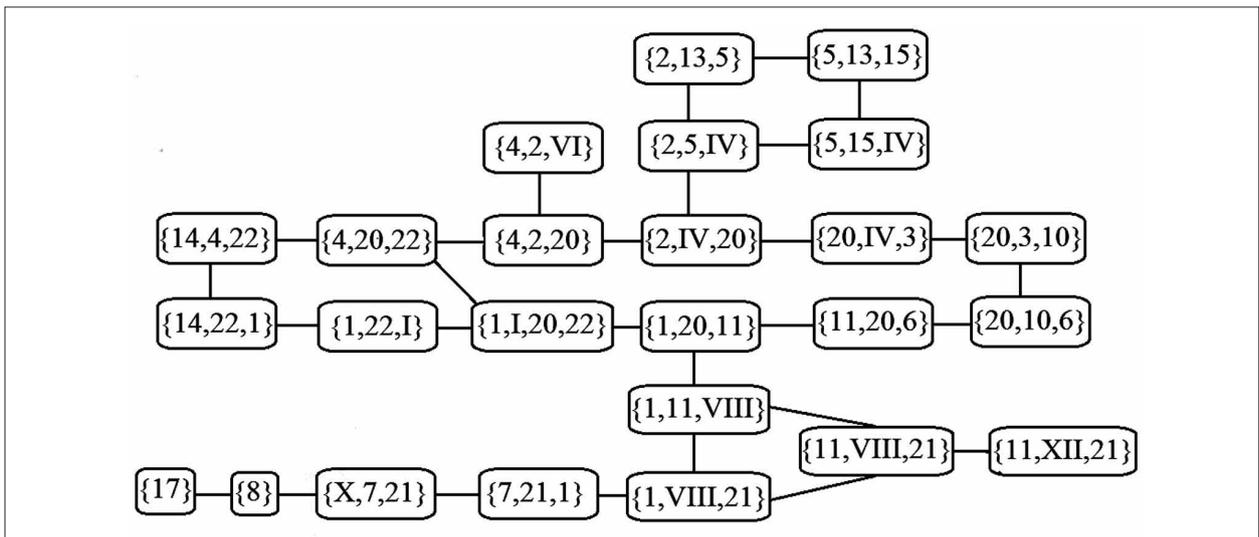


Рис. 3. Планарный граф G_2 / Fig. 3. Planar graph G_2

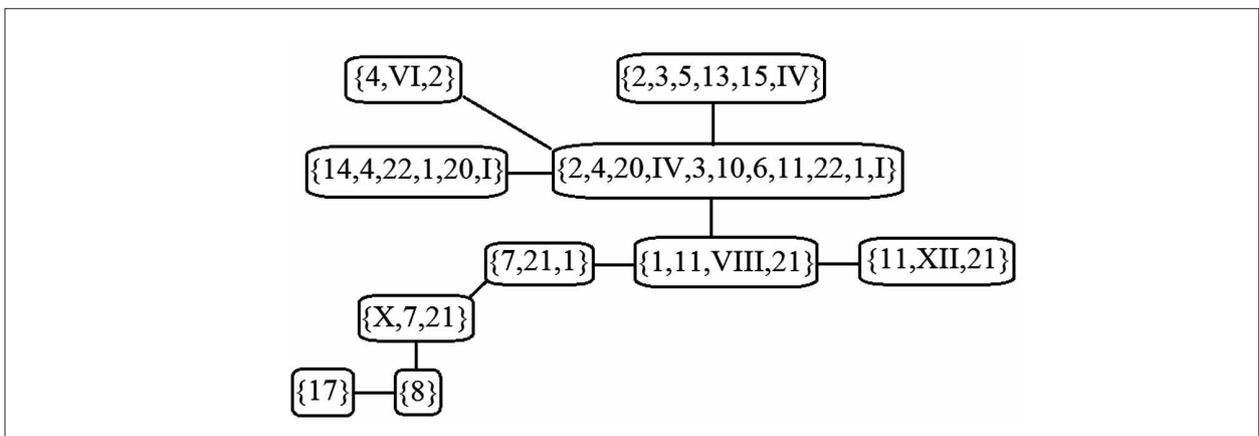


Рис. 4. Планарный граф G_3 / Fig. 4. Planar graph G_3

Таблица 2 / Table 2

Суммарное число следов тигра в вершинах графа G_3
The total number of tiger tracks at the vertices of the graph G_3

Совокупность районов в вершинах графа G_3 The set of districts at the vertices of the graph G_3	Суммарное число следов Total number of tracks	Пересечение совокупностей районов Intersection of collections of districts	Суммарное число следов в пересечении The total number of tracks in the intersection
{2,3,5,13,15,IV}	19856	{2,3,5,13,15,IV} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	1301
{2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	17229	{14,4,22,1,20,I} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	8481
{14,4,22,1,20,I}	8802	{4,VI,2} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	857
{4,VI,2}	1401	{1,11,VIII,21} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	5492
{1,11,VIII,21}	8943	{1,11,VIII,21} и / and {11,XII,21}	4883
{11,XII,21}	4945	{1,11,VIII,21} и / and {7,21,1}	7021
{7,21,1}	7731	{7,21,1} и / and {X,7,21}	3916
{X,7,21}	6290	нет / no	0
{8}	716	нет / no	0
{17}	1404	нет / no	0

Таблица 3 / Table 3

Суммарное число следов тигра в вершинах графа G_3 , входящие в выделенные зоны
The total number of tiger tracks in the vertices of graph G_3 included in the selected zones

Зона Zone	Совокупность районов в зоне Set of districts in the zone	Суммарное число следов Total number of tracks
Северная / Northern	{2,3,5,13,15,IV}	19856
Центральная / Central	{2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}, {14,4,22,1,20,I}, {4,VI,2}	18177
Южная / South	{1,11,VIII,21}, {7,21,1}, {11,XII,21}	9715
Юго-западная South-western	{X,7,21}, {8}, {17}	8410

соединённые ребром. В нашем случае, например, вершины {7, 1, 21} и {1, 11, 21, VIII} имеют общие районы с номерами 1, 21.

Для получения этих пространственных закономерностей на основе анализа числа следов тигра в МО Приморского края (табл. 3) были выделены четыре зоны: северная (19856 следа), центральная (18177 следов), южная (9715 следов) и юго-западная зона (8410 следов) (табл. 3).

Северная зона состоит из набора районов {2,3,5,13,15, IV}. Центральная зона состоит из совокупности районов, входящих в наборы {2,4,20, IV,3,10,6,11,22,1, I}, {14,4,22,1,20,I}, {4,VI,2}, причём из 8802 следов в районах набора {14,4,22,1,20,I} большая часть (8481 следов) входят в районы набора {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}. Аналогично из 1401 следов в районах набора {4,VI,2} большая

часть – 857 следов входят в районы набора {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}.

В свете полученных закономерностей могут быть более объяснимы нередкие и несистематизированные факты территориальных перемещений амурского тигра в соседние с Приморским краем административные субъекты РФ, как и миграции за рубеж в трансграничные с Приморьем китайские провинции [17]. Полагаем, что предложенная схема расчётов также может быть успешно применена для уточнения и верификации результатов моделирования пространственного распределения и общей численности популяции амурского тигра [18]. Это и объясняет объединение этих наборов в центральную зону. Следует отметить, что северная (19856 следов) и центральная зоны (18177) имеют всего 1301 общих следов, т. е. пересечение этих зон по следам тигров слабое

(табл. 3). Более половины следов (5492 следа) южной зоны (9715 следов) входят в центральную зону, т. е. пересечение южной и центральной зон существенно больше, чем пересечение северной и центральной зон. Юго-западная зона (8410 следов) имеет 3916 общих следов с южной зоной (9715 следов). Она включает в себя помимо набора районов {X,7,21} (6290 следов) ещё районы {8} (716 следов), {17} (1404 следа). Отметим, что южная зона состоит из совокупности районов, входящих в наборы {1,11,VIII,21}, {7,21,1}, {11,XII,21}. Причём из 7731 следов в районах набора {7,21,1} большая часть (7021 следов) входят в районы набора {1,11,VIII,21}. Аналогично из 4945 следов в районах набора {11,XII,21} большая часть (4883 следов) входит в районы набора

{1,11,VIII,21}. Это объясняет объединение этих наборов в южную зону. Однако следы в этих районах не пересекаются между собой и с набором районов {X,7,21}. Поэтому юго-западная зона состоит из непересекающихся по следам наборов районов и включение в неё этих наборов районов чисто условное.

Полученные результаты могут также быть представлены в виде карты административных районов Приморского края со штриховкой, соответствующей выделенным зонам (рис. 5). Таким образом, в прикладном аспекте интерпретации математически обработанных сведений мы получаем информацию о существовании тигриных кластеров, которые не были выявлены традиционными зоологическими способами обработки данных (см. [19, 20]).

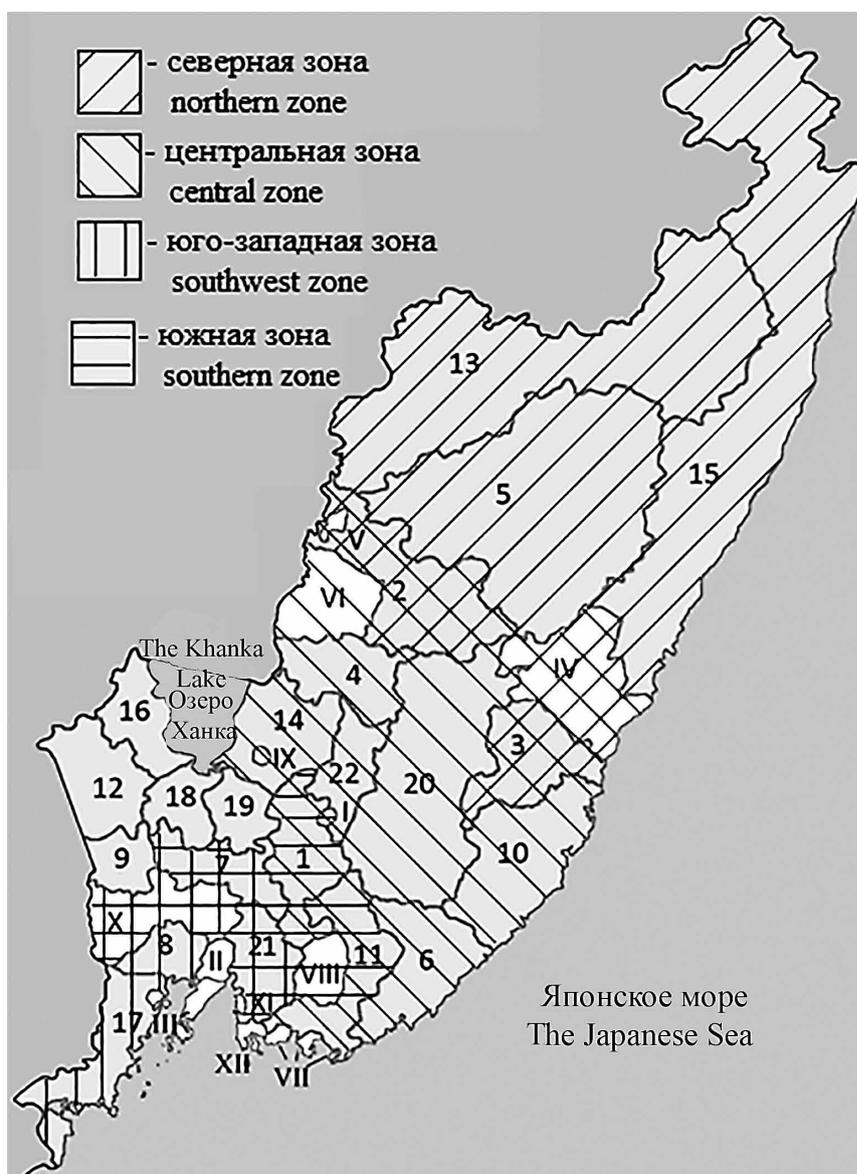


Рис. 5. Зоны обитания тигра на территории Приморского края (номера районов см. в таблице 1)
 Fig. 5. Tiger habitat areas in Primorsky Krai (see Table 1 for district numbers)

Получение новых сведений о пространственных закономерностях в распределении популяционных группировок амурского тигра даёт возможность планирования специальных полевых исследований и осуществления уточняющих учётных работ, которые представят больше эмпирического материала по планированию природоохранных мер для амурского тигра на территории Приморского края.

Заключение

Основными результатами работы являются построение специального алгоритма выделения пересекающихся зон обитания амурского тигра в Приморском крае. Этот алгоритм основан на понятии плоского графа и на данных по числу следов в МО. Подсчитано общее число следов тигра в пересекающихся соседних зонах с целью выявления возможных миграций тигров между ними. По нашему мнению использование элементов теории графов [21] позволит развить построенный в работе алгоритм и определить кратчайшие пути (по числу пересекаемых границ между МО) перемещения тигра к границам Приморского края.

Сохранение тигра – это сложная, многоплановая работа [22], и рассмотренные нами методы математической обработки больших данных позволят рассматривать новые возможности обобщения и картографирования различных типов зоологической и охотоведческой информации. В этой связи тигриные кластеры, как возможность наглядного представления и анализа данных по распределению тигра, позволяют не только обоснованно дифференцировать природоохранные меры по поддержанию численности амурского тигра, но и дают возможность получать более полную картину этологических и экологических процессов, происходящих в тигриной популяции на территории Приморского края.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Тихоокеанского института географии ДВО РАН Е.Г. Егидареву и А.А. Мурзину за обеспечение материалами и всестороннюю помощь в подготовке первичных данных.

Литература

1. Дунищенко Ю.М., Арамилев С.В. Амурский тигр: некоронованный властелин тайги. М.: АНО «Центр «Амурский тигр», 2020. 93 с.
2. Амурский тигр в России / сост. Е.Н. Матюшкин. М., 1998. 412 с.

3. Tiger politics and tiger conservation: Where the stakeholders are going wrong (commentary) [Электронный ресурс] <https://news.mongabay.com/2022/04/tiger-politics-and-tiger-conservation-where-the-stakeholders-are-going-wrong-commentary/> (Дата обращения: 13.04.2024).
4. Амурский тигр [Электронный ресурс] <https://www.rgo.ru/ru/proekty/sohranenie-redkih-vidov-amurskiy-tigr/ob-amurskom-tigre> (Дата обращения: 13.04.2024).
5. Красная книга Российской Федерации [Электронный ресурс] https://www.mnr.gov.ru/activity/red_book/krasnaya-kniga-rossiyskoy-federatsii/ (Дата обращения: 13.04.2022).
6. Абрамов К.Г. К методике учёта тигра // Вопросы организации и методы учета ресурсов фауны наземных позвоночных животных. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 53–54.
7. Юдаков А.Г., Николаев И.Г. Зимняя экология амурского тигра. Владивосток: Дальнаука, 2012. 202 с.
8. Тигры Сихотэ-Алинского заповедника: экология и сохранение / Под ред. Д.Дж. Микелл, Е.Н. Смирнова, Дж.М. Гудрич. Владивосток: ПСП, 2005. 224 с.
9. Матюшкин Е.Н. Выбор пути и освоение территории амурским тигром (по данным зимних троплений) // Поведение млекопитающих. М.: Наука, 1977. С. 146–178.
10. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Изучение лесовосстановления на основе спутниковых снимков высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 38–43.
11. Лохов А.С., Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б., Тутьгин А.Г. Географо-экологическое районирование трассы нефтепровода по степени опасности воздействия на окружающую среду при аварийных разливах нефти в Арктике // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 43–48. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-043-048
12. Микелл Д.Дж., Пикунов Д.Г., Дунищенко Ю.М., Арамилев В.В., Николаев И.Г., Абрамов В.К., Смирнов Е.Н., Салькина Г.П., Мурзин А.А., Матюшкин Е.Н. Теоретические основы учёта амурского тигра и его кормовых ресурсов на Дальнем Востоке России. Владивосток: Дальнаука, 2006. 179 с.
13. Прасолов В.В. Элементы комбинаторной и дифференциальной топологии. М.: МЦНМО, 2004. 352 с.
14. Bondy A., Murty U.S.R. Graph Theory. London: Springer, 2008. 663 p.
15. Харари Ф. Теория графов. М.: URSS, 2022. 304 с.
16. Ерошенко Г.А., Краснов Я.М., Носов Н.Ю., Куклева Л.М., Никифоров К.А., Оглодин Е.Г., Кутырев В.В. Совершенствование подвидовой классификации *Yersinia pestis* на основе данных полногеномного секвенирования штаммов из России и сопредельных государств // Проблемы особо опасных инфекций. 2015. № 4. С. 58–64. doi: 10.21055/0370-1069-2015-4-58-64
17. Баранов П.В., Бочарников В.Н., Кашкаров Е.П. Глобальное потепление и вековой ритм расселения крупных кошек на северной периферии ареала // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 2 (24). С. 82–91.

18. Мурзин А.А. Построение модели динамики популяции амурского тигра и прогнозные расчёты его численности на период с 2015 по 2022 год // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 11-2. С. 333–340. doi: 10.17513/mjrfi.12501

19. Пикунов Д.Г., Серёдкин И.В., Солкин В.А. Амурский тигр (история изучения, динамика ареала, численности, экология и стратегия охраны). Владивосток: Дальнаука, 2010. 104 с.

20. Пикунов Д.Г., Микелл Д.Г., Серёдкин И.В., Николаев И.Г., Дунишенко Ю.М. Зимние следовые учёты амурского тигра на Дальнем Востоке России: методика и история проведения учётов. Владивосток: Дальнаука, 2014. 132 с.

21. Tsitsiashvili G. Processing large outliers in arrays of observations // Mathematics. 2022. No. 10 (18). Article No. 3399. doi: 10.3390/math10183399

22. Дунишенко Ю.М., Ермолин А.Б. Тигры в снегах Приамурья. Хабаровск: Хабаровская краевая типография, 2020. 61 с.

References

1. Dunishenko Yu.M., Aramilev S.V. Amur tiger: the uncrowned master of the taiga. Moskva: ANO "Tsentr "Amurskiy tigr", 2020. 93 p. (in Russian).

2. The Amur tiger in Russia / Ed. E.N. Matyushkin. Moskva, 1998. 412 p. (in Russian).

3. Tiger politics and tiger conservation: Where the stakeholders are going wrong (commentary) [Internet resource] <https://news.mongabay.com/2022/04/tiger-politics-and-tiger-conservation-where-the-stakeholders-are-going-wrong-commentary/> (Accessed: 13.04.2024).

4. Protection of endangered species: Siberian tiger [Internet resource] <https://www.rgo.ru/en/projects/protection-and-study-endangered-species/protection-endangered-species-siberian-tiger> (Accessed: 13.04.2024).

5. Red Book of the Russian Federation [Internet resource] https://www.mnr.gov.ru/activity/red_book/krasnaya-kniga-rossiyskoy-federatsii/ (Accessed: 13.04.2022).

6. Abramov K.G. To the method of counting the tiger // Voprosy organizatsii i metody ucheta resursov fauny nazemnykh pozvonochnykh zhivotnykh. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1961. P. 53–54 (in Russian).

7. Yudakov A.G., Nikolaev I.G. Winter ecology of the Amur tiger. Vladivostok: Dalnauka, 2012. 202 p. (in Russian).

8. Tigers of the Sikhote-Alin Reserve: ecology and conservation / Eds. D.G. Mikell, E.N. Smirnov, G.M. Gudrich. Vladivostok: PSP, 2005. 224 p. (in Russian).

9. Matyushkin E.N. Choice of path and development of the territory by the Amur tiger (according to winter tracking data) // Povedenie mlekopitayushchikh. Moskva: Nauka, 1977. P. 146–178 (in Russian).

10. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Study of reforestation based on high-res-

olution satellite images // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043

11. Lokhov A.S., Gubaidullin M.G., Korobov V.B., Tutygin A.G. Geographical and ecological zoning of the oil pipeline route according to the degree of danger of environmental impact in case of accidental oil spills in the Arctic // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 43–48 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-043-048

12. Mikell D.J., Pikunov D.G., Dunishenko Yu.M., Aramilev V.V., Nikolaev I.G., Abramov V.K., Smirnov E.N., Salkina G.P., Murzin A.A., Matyushkin E.N. Theoretical bases of accounting for the Amur tiger and its food resources in the Russian Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 179 p. (in Russian).

13. Prasolov V.V. Elements of combinatorial and differential topology. Moskva: MTsNMO, 2004. 352 p. (in Russian).

14. Bondy A., Murty U.S.R. Graph theory. London: Springer, 2008. 663 p.

15. Harary F. Graph theory. Moskva: URSS, 2022. 304 p. (in Russian).

16. Eroshenko G.A., Krasnov Ya.M., Nosov N.Yu., Kukleva L.M., Nikiforov K.A., Oglodin E.G., Kutuyev V.V. Updating of intra-specific *Yersinia pestis* classification, based on the results of whole-genome sequencing of the strains from Russian Federation and the neighboring states // Problems of Particularly Dangerous Infections. 2015. No. 4. P. 58–64 (in Russian). doi: 10.21055/0370-1069-2015-4-58-64

17. Baranov P.V., Bocharnikov V.N., Kashkarov E.P. Global warming and century rhythm of settlement of large cats on range of northern periphery // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2013. No. 2 (24). P. 82–91 (in Russian).

18. Murzin A.A. Constructing the dynamics model of the Amur tiger population and forecast estimates of its census for the period from 2015 to 2022 // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2018. No. 11-2. P. 333–340 (in Russian). doi: 10.17513/mjrfi.12501

19. Pikunov D.G., Seryodkin I.V., Solkin V.A. The Amur tiger: history, distribution, population dynamics, ecology and conservation strategies. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 104 p. (in Russian).

20. Pikunov D.G., Mikell D.G., Sereдкин I.V., Nikolaev I.G., Dunishenko Yu.M. Winter track surveys of Amur tigers in the Russian Far East (methods and history of tiger surveys). Vladivostok: Dalnauka, 2014. 132 p. (in Russian).

21. Tsitsiashvili G. Processing large outliers in arrays of observations // Mathematics. 2022. No. 10 (18). Article No. 3399. doi: 10.3390/math10183399

22. Dunishenko Yu.M., Ermolin A.B. Tigers in the snows of the Amur region. Khabarovsk: Khabarovskaya kraevaya tipografiya, 2020. 61 p.